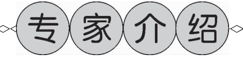
DOI:10.11776/j.issn.1000-4939.2025.01.001





马克俭,中国工程院院士,中国建筑空间结构专家,九三学社社员。1933 年生于湖南岳阳。1958 年毕业于湖南大学土木系。现任贵州大学空间结构研究中心主任及贵州省绿色建筑与智能建造全省重点实验室主任。曾任湖南大学、浙江大学、天津大学、河北工业大学博士生导师,同济大学顾问教授;曾任中国钢结构协会预应力结构分会理事会理事、中国建筑学会名誉理事、中国土木工程学会空间结构委员会资深委员、贵州省第十届和第十一届政协委员、贵州省科协副主席、贵州省土木工程学会名誉主席、贵州省建筑学会常务理事、贵州省结构委员会主任委员等。获全国劳动模范称号及“五一”劳动奖章、贵州省“最美科技工作者”称号,入选贵州省首批省管专家、勘察设计大师和荣誉核心专家,获得中国建筑学会“突出贡献奖”、中国钢结构协会“终身成就奖”、“中国钢结构三十年领军人物”称号、卓越贡献奖及最高成就奖等,享受国务院特殊津贴。首创混凝土、钢与钢 - 混凝土组合的空腹网架、空腹夹层板等多层大跨度楼盖结构,首次提出大跨度与超大跨度预应力组合扭网格及预应力扁网壳结构。出版专著 4 部,编制国家规程 1 部、地区规程 3 部,发表学术论文 100 余篇,授权专利 100 余件。成果获国家科技进步三等奖 1 项、贵州省最高科学技术奖、贵州省科技进步一等奖 2 项、二等奖 2 项、建设部科技进步二等奖 1 项等。

空间网格空腹夹层板结构创新与实践最新进展

陈红鸟[1],杨瑛[2],田鹏刚[3],周正荣[4],陈靖[1],魏艳辉[1],马克俭[1]

(1. 贵州大学空间结构研究中心,550025 贵阳;2. 中国建筑第五工程局有限公司,410004 长沙;
3. 陕西建工控股集团未来城市创新科技有限公司,712000 西安;4. 中国水利水电第九工程局有限公司,550081 贵阳)

摘 要:为了解决大跨度空腹网架结构抗剪刚度不足的问题,贵州大学马克俭教授于 20 世纪 90 年代创新地提出了空腹夹层板结构。通过减小竖杆的高宽比,使之形成“超短柱”,即剪力键,利用剪力键连接上、下肋协同受力,从而使空腹夹层板结构具有较大的剪切刚度,其整体力学特性介于密肋井字楼盖与空腹网架之间。系统回顾了空腹夹层板结构的发展历程,介绍了该结构的组成和分类,总结了该结构的几何和力学特点,归纳了现有的理论分析方法与技术规程、结构优势及工程应用案例,尤其是 2010 年以后的工程实践进展;最后,对空腹夹层板结构体系的应用前景进行展望。空腹夹层板结构具有大跨度灵活划分空间、节约层高、降低结构自重、节省建筑用材、空腹可穿越管线等诸多优势,在全国 30 个省(市、自治区)的实际工程应用面积已达 300 余万平方米,节约建设资金超过 2 亿元。空腹夹层板结构体系的理论及实践创新体现了新时代的科技自立自强,采用多高层大跨度空腹夹层板楼盖结构可节约土地资源,对促进我国生态文明建设有重要意义。

关键词:钢筋混凝土;空腹夹层板;大跨度结构;多高层建筑;网格结构

中图分类号:TU375;TU398 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-4939(2025)01-0001-20

收稿日期:2024-10-22
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 52278251);贵州省科技成果转换(一般项目)(黔科合成果[2023]一般 081)
通信作者:马克俭,中国工程院院士,教授。E-mail:makejian2002@163.com
引用格式:陈红鸟,杨瑛,田鹏刚,等. 空间网格空腹夹层板结构创新与实践最新进展[J]. 应用力学学报,2025,42(1):1-20.
CHEN Hongniao, YANG Ying, TIAN Penggang, et al. Recent progress in innovation and practice of spatial grid open-web sandwich plate structure[J]. Chinese journal of applied mechanics,2025,42(1):1-20.

Recent progress in innovation and practice of spatial grid open-web sandwich plate structure

CHEN Hongniao[1], YANG Ying[2], TIAN Penggang[3], ZHOU Zhengrong[4], CHEN Jing[1], WEI Yanhui[1], MA Kejian[1]

(1. Research Center of Space Structures, Guizhou University, 550025 Guiyang, China;
2. China Construction Fifth Engineering Bureau Co., Ltd., 410004 Changsha, China;
3. Future City Innovation Technology Co., Ltd., Shaanxi Construction Engineering Holding Group, 712000 Xi'an, China;
4. Sinohydro Bureau 9 Co., Ltd., 550081 Guiyang, China)

Abstract: To solve the problem of insufficient shear stiffness of large-span open-web grid structures, Professor Ma Kejian from Guizhou University innovatively proposed an open-web sandwich plate structure in the 1990s. By reducing the height/width ratio of vertical webs, "ultra short columns" are formed and known as shear keys which connect the upper and lower ribs of the open-web sandwich plate to work together; thus the plate has a high shear stiffness and its overall mechanical properties are between the multi-ribbed slabs and open-web grid structures. The paper systematically reviews the development history of the open-web sandwich plate structure, introduces its components and classification, summarizes its geometrical and mechanical characteristics, concludes existing theoretical analysis methods and technical regulations, structural advantages, and engineering application cases, especially the engineering practice progress since 2010. Finally, the application prospects of open-web sandwich plate are discussed. The open-web sandwich plate has many advantages, such as flexible division of large-span space, saving floor height, reducing structure weight, saving building materials, and being able to pass pipelines through the open-web part. It has been applied in more than 3 million square meters of actual projects in 30 provinces (cities, autonomous regions), saving more than 200 million in construction cost. The theoretical and practical innovation of the open-web sandwich plate structure system reflects the self-reliance in science and technology in the new era. The application of multi-story or high-rise buildings with large-span open-web sandwich floors can save land resources, which is of great significance for promoting the construction of ecological civilization in China.

Key words: reinforced concrete; open-web sandwich plate; large-span structure; multi-story or high-rise building; grid structure

"钢筋混凝土空腹夹层板"早期又称"剪力键式双向空心大板"[1],是由混凝土空腹网架结构发展演变而来。一般混凝土框架结构的水平抗力构件(如梁和板)尺寸由梁系控制,构件高度及自重随跨度的增大而增加[2-3]。因此,在大跨度建筑中,若采用常规框架结构,其梁截面高度可达1~2 m,自重较大;若采用空腹桁架,其自重可降至框架结构的1/3~1/4。此外,当结构层高受限时,为了减小楼盖高度,多采用密肋楼盖,其力学特点等效于板,因此构件尺寸可由板系来控制。然而,由于密肋楼盖的材料用量大,且设备管线需通过吊顶处理,其降低层高的效果有限,而采用预应力平板体系虽然能有效降低结构高度,但施工复杂且成本较高[4]。为了解决以上问题,马克俭教授于上世纪80年代提出了钢筋混凝土空腹网架结构;然而,该结构仅有竖杆而无斜腹杆,结构的抗剪刚度较低,易受剪切变形的影响。

为了解决大跨度空腹网架结构抗剪刚度不足的问题,马克俭教授于1995年提出了空腹夹层板结构[5]。其灵感来源于一种"离缝式键结合"木梁,如图1(a)所示,在2根原木间楔入硬木后,再用螺栓紧固。受此启发,马克俭教授将其发展成剪力键结构,剪力键结构以上为上肋,以下为下肋;通过剪力

键连接上、下肋共同受力,形成腹部带有空腔的空腹梁,如图 1(b)所示。不同方向的空腹梁在剪力键处相互交叉,形成空腹网格结构(图 2a),与上部混凝土薄板共同组成空腹夹层板结构(图 2b)。

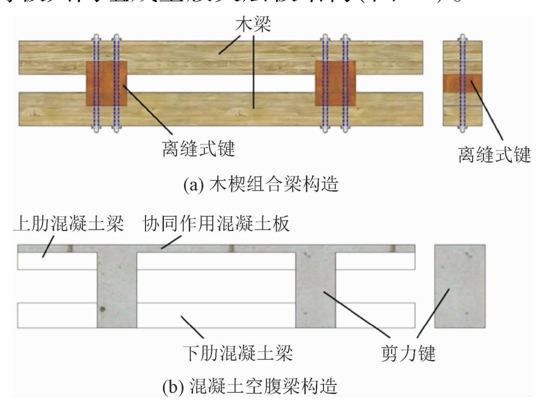


图 1　“离缝式键结合”木梁及混凝土空腹梁

Fig. 1　Separated wooden beams with key joints and concrete open-web beam

空腹夹层板是将实心大板双向挖空的大板结构[5],具备“承重、围护和管线支架”等多种功能,适用于大跨度多高层建筑。针对该结构,团队开展了多次大比例尺模型的静力超载试验,并经过反复验证,促使该结构的工程实践和设计理论逐步成熟,地方标准相继发布。例如,2005 年贵州省地方标准《钢筋混凝土空腹夹层板楼盖结构技术规程》[6],2014 年黑龙江省地方标准《钢筋混凝土空间网格结构空腹夹层板楼盖技术规程》[7],以及 2019 年湖南省地方标准《装配式空腹楼盖钢网格盒式结构技术规程》[8]。

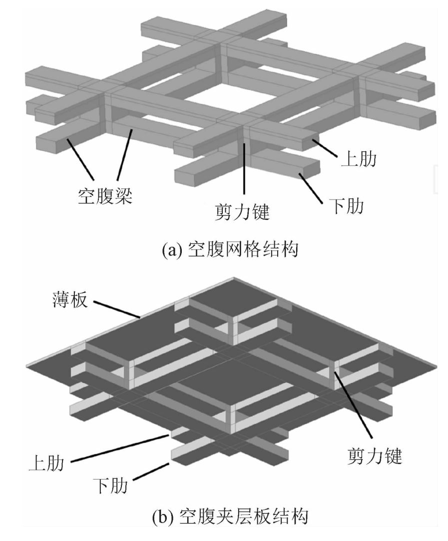


图 2　空腹网格结构与空腹夹层板结构

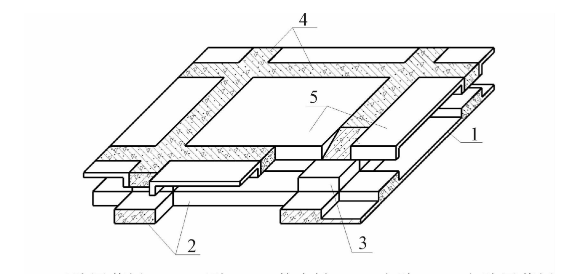
Fig. 2　Open-web grid structure and open-web sandwich plate structure

空腹夹层板结构不仅可以实现空间灵活划分,空腹穿越管线可降低层高,还能减轻结构自重,减少材料用量,降低工程造价,降低地震作用对结构的影响。此外,应用于多高层大跨度建筑,可以有效提高建筑用地的利用率,节约土地资源。目前,空腹夹层板结构体系已在贵州、四川、湖南、安徽、山东、广东、广西、青海、吉林、黑龙江、上海等 30 余个省(市、自治区)推广,应用面积达 300 余万平方米。工程实践表明,采用多高层大跨度空腹夹层板楼盖体系,工程总造价可降低 15% ~35% ,社会效益与经济效益显著,对促进我国生态文明建设有重要意义。

1　空腹夹层板结构的分类及特点

1.1　空腹夹层板结构的组成

空腹夹层板的结构组成从下往上依次为下肋层薄板、下肋、剪力键、上肋及上肋层薄板,如图 3 所示。



1—下肋层薄板; 2—下肋; 3—剪力键; 4—上肋; 5—上肋层薄板

图 3　空腹夹层板的结构组成

Fig. 3　Structural components of open-web sandwich plate

1.2　空腹夹层板结构的分类

1.2.1　按下肋层组成情况分类

根据下肋层薄板的组成情况,空腹夹层板可分为Ⅰ型、Ⅱ型和Ⅲ型[6](图 4)。

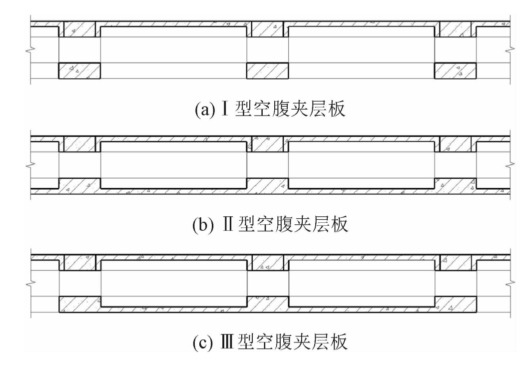


图 4　空腹夹层板类型

Fig. 4　Types of open-web sandwich plate

Ⅰ型空腹夹层板的下肋层仅有下肋而无薄板,网格外露;Ⅱ型空腹夹层板的下肋层由下肋和薄板

组成,网格不外露;Ⅲ型空腹夹层板的下肋层仅在局部网格处设置薄板。

为了方便各类管线在结构空腹内穿越,实际工程多采用Ⅰ型空腹夹层板,因此后面涉及的空腹夹层板结构仅有上肋层薄板,也称协同工作混凝土板或表层薄板。

1.2.2 按网格形状分类

1)正交型网格

①正交正放型

空腹夹层板网格的正交正放包含两层含义:一是双向网格相互垂直,二是网格与四周边梁垂直相交。设空腹夹层板楼盖的长边尺寸为 L_x,短边尺寸为 L_y,当 $L_x/L_y \leqslant 1.5$ 时,楼盖网格与四周边梁宜采用正交正放的布置方式,如图5所示。图中 l_a 为单个网格尺寸,m 和 n 分别为短边和长边的网格数。

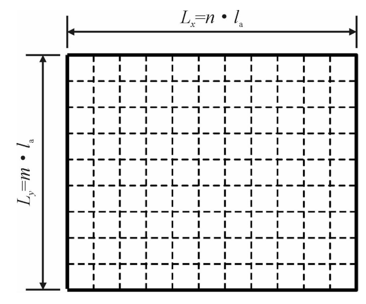


图5 正交正放楼盖平面图

Fig. 5 Plan of floor system with orthogonal open-web beams vertical to boundary beams

②正交斜放型

空腹夹层板网格的正交斜放包含两层含义:一是双向网格相互垂直,二是网格与四周边梁不垂直相交,其夹角约为45°。设楼盖的长边尺寸为 L_x,短边尺寸为 L_y,当 $L_x/L_y > 1.5$ 时,楼盖网格与四周边梁宜采用正交斜放的布置方式,如图6所示。

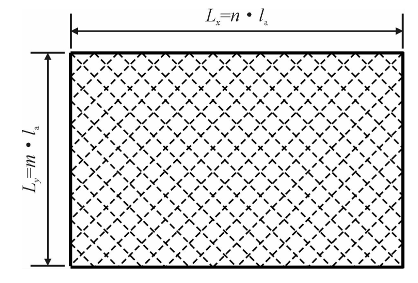


图6 正交斜放楼盖平面图

Fig. 6 Plan of floor system with orthogonal open-web beams oblique to boundary beams

2)蜂窝型网格

当楼盖形状为正多边形或圆形时,建议采用蜂窝型网格,以确保3个方向均匀受力,蜂窝型网格及其四周边梁的布置方式如图7所示。

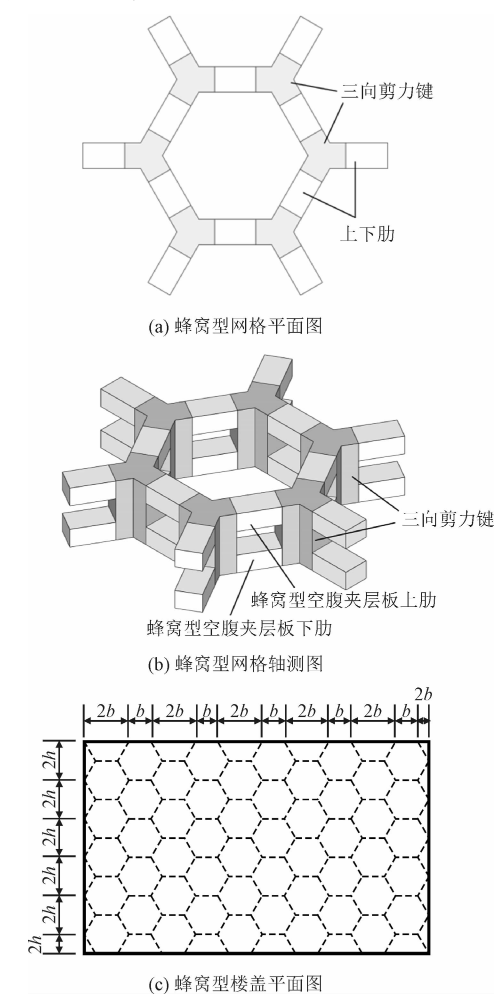


图7 蜂窝型楼盖示意图

Fig. 7 Schematic diagram of floor system with honeycomb-shaped open-web beams

1.2.3 按组成材料分类

1)钢筋混凝土空腹夹层板

混凝土材料具有优异的耐久性和耐火性,是建筑结构的理想用材[9]。钢筋混凝土空腹夹层板结构的上、下肋、上肋层薄板和剪力键均由钢筋混凝土浇筑而成,其结构组成如图8所示。

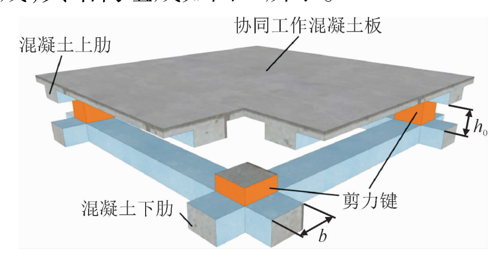


图8 钢筋混凝土空腹夹层板[10]

Fig. 8 Open-web sandwich plate made of reinforced concrete[10]

钢筋混凝土空腹夹层板结构可应用于大柱网(9~12 m)多高层建筑、大跨度(18~36 m)多高层

建筑,以及其他形状(如圆形和椭圆形)平面建筑[2],适用范围较广。此外,传统大跨度建筑多采用钢结构屋盖,在酸雨、沿海盐雾等不良环境因素作用下,钢结构易受腐蚀,维修和防护成本较高[10]。相比之下,混凝土材料具有优异的耐火性和耐腐蚀性,因此钢筋混凝土空腹夹层板具备良好的环境适应性。

2)钢空腹夹层板

钢结构具有自重轻、抗震性能好、便于装配施工等优点,特别适用于大跨度工业与民用建筑。因此,马克俭教授团队提出了钢空腹夹层板结构,该结构的上、下肋采用型钢,剪力键采用四周增设加劲板的方钢管或圆钢管,其结构组成如图 9 所示。

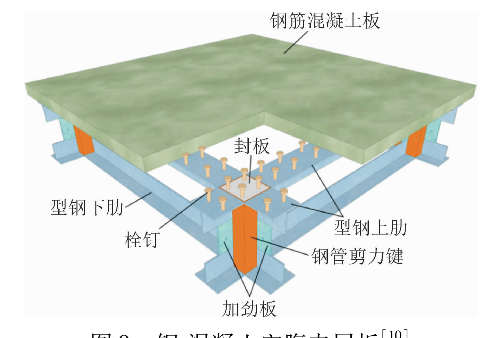


图 9 钢-混凝土空腹夹层板[10]

Fig. 9 Open-web sandwich plate made of shaped steel[10]

相较于钢筋混凝土空腹夹层板,钢网格空腹夹层板便于装配化施工,可缩短建筑工期。魏艳辉等[11]通过对足尺节点模型实施静载试验和数值模拟,研究钢网格空腹夹层板的静力性能,验证了高强螺栓装配节点的连接可靠性。孙涛等[12]采用有限元模拟及简化方法分析钢空腹夹层板的结构参数,证实简化计算方法在工程设计中的适用性。刘卓群等[13]通过数值模拟研究了混凝土板对钢空腹夹层板楼盖静力性能的影响,当混凝土板厚在 120 mm 以内时,结构整体性能的提升最为明显,可为工程设计提供参考。然而,考虑到钢空腹夹层板的自重轻、整体刚度小,因此结构的动力性能和舒适度值得关注。姜岚等[14-16]通过现场试验和数值模拟方法对空腹夹层板结构的舒适度进行研究,通过对结构进行时程分析,计算楼盖加速度响应,为工程设计提供参考。

3)钢-混凝土组合空腹夹层板

①U 型钢-混凝土组合空腹夹层板

由于混凝土材料的抗拉强度较低,随着结构跨度的增大,在自重及荷载作用下,钢筋混凝土空腹夹层板的下肋混凝土会受拉开裂。为了解决下肋混凝土开裂问题,团队提出了 U 型钢-混凝土组合空腹夹层板结构,其结构组成如图 10 所示。该结构与一般钢筋混凝土空腹夹层板比较相似,不同的是,其下肋的底部和侧部由 U 型钢板包覆,钢板内设置栓钉从而保证与下肋混凝土共同受力。在浇筑下肋时,U 型钢板可充当下肋混凝土的浇筑模具;之后作为永久受力构件,与下肋钢筋混凝土共同承受荷载作用,有效抑制下肋混凝土表面开裂。

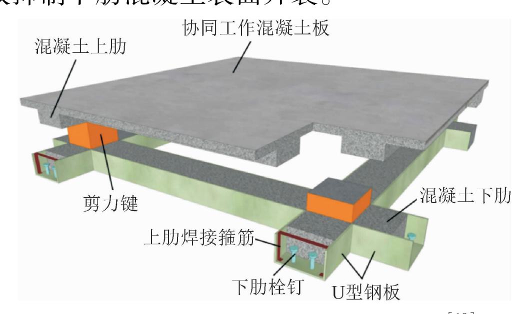


图 10 U 型钢-混凝土组合空腹夹层板[10]

Fig. 10 Composite open-web sandwich plate with U shaped steel and reinforced concrete[10]

姜岚等[17]对钢-混凝土协同式组合空腹夹层板楼盖的舒适度进行研究;胡岚等[18]等以最大跨度为 39 m 的哈尔滨中医药大学多层体育馆楼盖为例,通过现场实测对 U 型钢板-混凝土高强螺栓连接组合空腹夹层板楼盖结构进行研究,证实该结构满足舒适度要求[19]。

②钢-混凝土空腹板架结构

钢-混凝土空腹板架结构由上下两层组成,上层为一次性浇筑混凝土厚板,下层为型钢或焊接型钢双向交叉形成下弦,在下弦交叉点处用钢管(剪力较大时用钢管混凝土)连接上下两层,形成剪力键,如图 11 所示。考虑到结构的上层为混凝土厚板,为了减小应力集中,可在剪力键顶部安装钢板柱帽。该结构具有刚度大、截面高度小、用钢量少、施工方便等优点[20]。

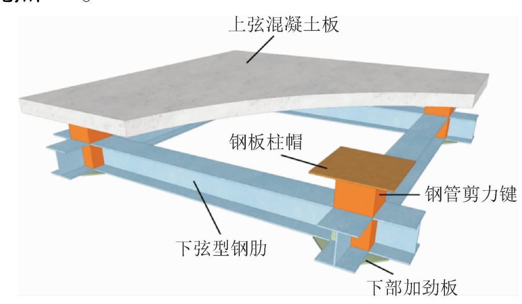


图 11 钢-混凝土空腹板架结构

Fig. 11 Composite open-web sandwich plate with steel lower rib and concrete slab

杜德静[21]采用连续化和离散化方法对钢-混凝土组合空腹板架结构进行分析,建立了相关理论和

数值分析方法。关于静力特性的研究[22]表明,钢-混凝土组合空腹板架结构竖向变形小,具有较大的刚度,并且下肋型钢主要受拉弯作用,而上层混凝土板主要受压弯作用,可充分发挥钢材和混凝土的材料优势。黄勇等[23]对钢-混凝土组合空腹板架结构在竖向地震作用下的地震响应进行研究,指出剪力键为受剪构件,下肋型钢为拉(压)弯构件,而混凝土板则主要受弯曲作用。总体而言,钢-混凝土空腹板架结构主要用于周边简支的楼盖或屋盖,以保证下肋受拉,上层厚板受压,从而充分发挥2种材料的优势;但考虑到楼盖与周边梁柱或剪力墙不是刚结,结构的整体性不高,因此该结构可用于低烈度区大柱网多层或大跨度单/双层建筑。

1.3 空腹夹层板结构的特点及力学模型

1.3.1 空腹夹层板的几何及力学特点

1)空腹夹层板的几何特点

钢筋混凝土空腹夹层板的结构组成与空腹网架相似,均由上弦杆、下弦杆和竖杆组成,中部为空腹且仅有竖杆而无斜腹杆。为便于对比,图12给出了两者的剖面构造图。

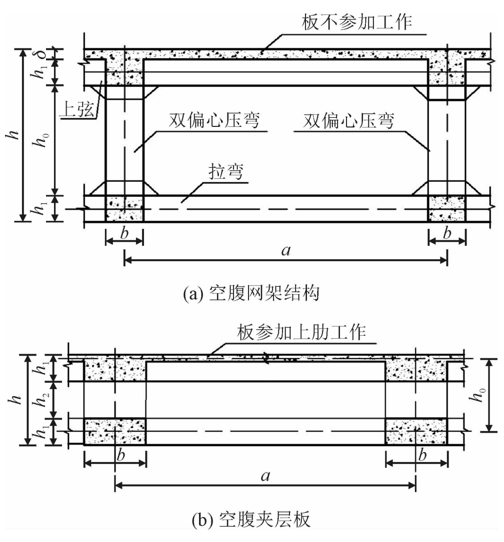


图12 2种结构剖面图

Fig. 12 Sectional drawings of two structures

由上图可知,空腹网架和空腹夹层板的组成相似,但两者的计算高度不同:空腹网架的表层薄板一般为搁置空心板,不参与受力,其计算高度 h_0 取上、下弦矩形截面的形心间距;而空腹夹层板的表层薄板与上弦整浇为一体,应考虑混凝土薄板参与受力,从而形成T型截面,计算形心相应上移。一般来说,空腹网架的结构高度 h 取跨度的1/15~1/18,而空腹夹层板的结构高度 h 仅为跨度的1/30~1/35,在跨度不变的情况下,空腹夹层板的结构高度大幅下降。此外,在空腹网架中,其上下弦矩形截面的高度 h_1 大于宽度 b,竖杆高宽比 h_2/b 可达2~4;而在空腹夹层板中,其弦杆高度 h_1 小于宽度 b,竖杆高宽比 $h_2/b<1$。因此,尽管两者的网格划分基本一致,但由于结构构造和几何尺寸不同,致使两者呈现不同的力学特点。

2)空腹夹层板的力学特点

由上文可知,尽管与空腹网架的组成相似,但由于空腹夹层板竖杆的高宽比较小,形成"超短柱"或"块体单元",即"剪力键",具有较大的剪切刚度,这是空腹夹层板结构的关键力学特性,也是其能跨越大跨度的原因[24]。

总的来说,空腹夹层板的力学特性介于密肋井字楼盖与空腹网架之间:空腹网架的结构高度大,因此抗弯刚度大而抗剪刚度小;密肋楼盖结构高度不大,但实心截面使其抗弯刚度和抗剪刚度均比较大,同时结构自重也大;空腹夹层板的结构高度与密肋楼盖相近,其抗弯刚度略小但抗剪刚度大。尽管空腹夹层板的抗弯刚度比密肋楼盖略低,但其腹部双向挖空,使得结构自重大幅降低,从结构实际承载和变形情况看,两者的整体刚度比较接近。考虑到结构的挠度与荷载成正比,空腹夹层板的"板系"结构优势在跨度 $L>9$ m 时才能充分发挥,因此该结构适用于大跨度多高层建筑。

1.3.2 钢筋混凝土空腹夹层板的力学模型及基本方程

以钢筋混凝土空腹夹层板为例,若薄板与上肋为嵌固连接,应考虑6倍厚度的面板参与受力从而形成T型截面。为便于分析,将空腹夹层板简化为由上、下表层及中间夹芯层组成的拟夹芯板,如图13所示。

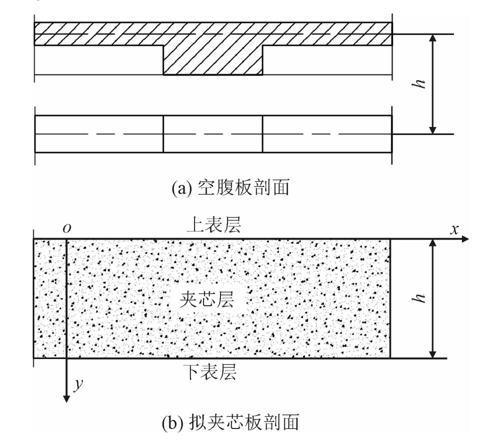


图13 空腹夹层板的简化力学模型

Fig. 13 Simplified mechanical model of open-web sandwich plate

考虑剪切变形的影响,假设计算参考面在拟夹芯板的上表层,根据合理的基本假定,可求出拟夹芯板的上下表层的薄膜刚度(B)和夹芯层的等代剪切刚度(C)[2]。采用夹芯板的 3 个广义位移,即挠度 w 和转角 θ_x、θ_y,再引入一个位移函数ϖ,可得到钢筋混凝土空腹夹层板的基本方程[2]为

$$\begin{aligned}&\Big\{ \Big[b_{22}\frac{\partial^4}{\partial x^4} + (2b_{12} + b_{33})\frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + b_{11}\frac{\partial^4}{\partial y^4} \Big] \Big[D_{11}\frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2(D_{12} + 2D_{33})\frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + D_{22}\frac{\partial^4}{\partial y^4} - \Big(\frac{D_{11}D_{33}}{C^2}\frac{\partial^4}{\partial x^4} + \\ &\frac{D_{11}D_{22} - D_{12}^2 - 2D_{12}D_{33}}{C^2}\frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{D_{22}D_{33}}{C^2}\frac{\partial^4}{\partial y^4} \Big) \Big(C_{11}\frac{\partial^2}{\partial x^2} + C_{22}\frac{\partial^2}{\partial y^2} \Big) \Big] + \Big[K_{12}\frac{\partial^3}{\partial x^3} + (K_{11} - K_{33})\frac{\partial^3}{\partial x \partial y^2} \Big]^2 \Big[\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \\ &\frac{D_{33}}{C_{22}}\frac{\partial^4}{\partial x^4} - \Big(\frac{D_{22}}{C_{22}} + \frac{D_{33}}{C_{11}} \Big)\frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} - \frac{D_{22}}{C_{11}}\frac{\partial^4}{\partial y^4} \Big] + \Big[(K_{22} - K_{33})\frac{\partial^3}{\partial x^2 \partial y} + K_{12}\frac{\partial^3}{\partial y^3} \Big]^2 \Big[\frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{D_{11}}{C_{22}}\frac{\partial^4}{\partial x^4} - \Big(\frac{D_{11}}{C_{11}} + \frac{D_{33}}{C_{22}} \Big)\frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} - \\ &\frac{D_{33}}{C_{11}}\frac{\partial^4}{\partial y^4} \Big] + 2\Big[K_{12}\frac{\partial^3}{\partial x^3} + (K_{11} - K_{33})\frac{\partial^3}{\partial x \partial y^2} \Big] \Big[(K_{22} - K_{33})\frac{\partial^3}{\partial x^2 \partial y} + K_{12}\frac{\partial^3}{\partial y^3} \Big] \cdot \\ &\Big[1 + \frac{D_{12} + D_{33}}{C^2}\Big(C_{11}\frac{\partial^2}{\partial x^2} + C_{22}\frac{\partial^2}{\partial y^2} \Big) \Big] \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \Big\} \varpi = q \end{aligned} \tag{1}$$

式(1)为位移函数ϖ 表示的 10 阶偏微分方程,阶数虽高,但仅与 x、y 的偶数阶偏导有关。若不考虑空腹夹层板的剪切变形,假设其抗剪刚度无限大,即 $C = C_{11} = C_{22} = \infty$,则式(1)退化为

$$\begin{aligned}&\Big\{ \Big[b_{22}\frac{\partial^4}{\partial x^4} + (2b_{12} + b_{33})\frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + b_{11}\frac{\partial^4}{\partial y^4} \Big] \Big[D_{11}\frac{\partial^4}{\partial x^4} + \\ &2(D_{12} + 2D_{33})\frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + D_{22}\frac{\partial^4}{\partial y^4} \Big] + \Big[K_{12}\frac{\partial^4}{\partial x^4} + \\ &(K_{11} + K_{22} - 2K_{33})\frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + K_{12}\frac{\partial^4}{\partial y^4} \Big]^2 \Big\} \varpi = q \end{aligned} \tag{2}$$

式(2)为 8 阶偏微分方程,是常规密肋井字楼盖的基本方程。基本方程式(1)~式(2)从理论上证实,钢筋混凝土空腹夹层板的力学特性介于混凝土空腹网架和密肋井字楼盖之间。

2　空腹夹层板的理论计算方法与现有技术规程

近年来,马克俭教授团队对钢筋混凝土空腹夹层板进行了系统研究,掌握了这一新型空间板系结构体系的内在规律与力学特点。通过与国内外已广泛应用的混凝土井字楼盖进行对比分析,探明两者在力学特性上的异同[25]。马克俭等[26]通过分解刚度法研究空腹夹层板的整体稳定性,结果表明空腹夹层板的临界荷载是同等质量实心板的 8.68 倍,证实该结构的平面刚度很大、整体稳定性很好,可以沿用刚性楼板假定进行设计和分析。段渝忠等[27]通过理论和试验方法研究空腹夹层板节点的破坏机理,结果表明,在剪力键设计合理的情况下,空腹夹层板的破坏形式为弯曲破坏。此外,团队还对空腹夹层板的关键节点进行了大量研究,通过试验和数值模拟分析对比,为该结构的推广应用奠定了理论和实践基础[4]。

2.1　空腹夹层板的理论计算方法

作为一种空间结构,空腹夹层板的承载机制跟所在的结构体系有关[28]:当用于砖混结构时,结构的侧向约束比较弱,可等效为一块板;当用于框架或框剪结构时,与框架柱和剪力墙等共同工作,形成空间抗侧力体系[28]。因此,空腹夹层板的理论分析比较复杂,主要从连续化和离散化两方面考虑。

2.1.1　连续化方法

该方法的基本思路是利用刚度等效的原则将空腹夹层板的基本构件等效成拟夹芯板的上、下表层和中部夹芯层,采用拟夹层板分析法,建立空腹夹层板的基本方程[29],详见 1.3.2 节。利用抗弯刚度等效的方法,可将空腹夹层板简化为实心无梁楼盖,并将其划分为柱上和跨中板带。参照框架结构的“等代框梁法”计算无梁楼盖,求得各点的内力,再以这些内力作为夹层板的外力,求出空腹夹层板各杆件的内力[5]。

黄勇等[30]采用 2 种连续化分析模型(3 层板模型和 5 层板模型)分析空腹夹层板的力学性能。结果表明,5 层板模型与实际结构更接近,得到的解也更精确;3 层板模型不够精确,但计算简单,且分析结果偏于安全,适用于工程分析。

2.1.2　离散化方法

离散化方法的基本思路是将空腹夹层板的基本构件离散为不同的单元,例如,表层薄板离散为二维板壳单元,上下肋离散为三维梁单元,剪力键离散为

三维块体单元。针对不同的单元建立刚度矩阵,再根据节点平衡建立总刚度矩阵及刚度方程,通过解总刚度方程,即可得到不同单元的内力,具体原理及步骤详见文献[31]。根据离散程度的不同主要分为2种模型[32]:①板壳-块体元模型,该模型中,将空腹夹层板的表层薄板与肋离散为变厚度的平面壳单元,将剪力键离散为空间块体单元;②板壳-梁-剪切元模型[32],该模型中,将空腹夹层板的肋离散为三维梁单元,表层薄板离散为二维板壳单元,剪力键离散为一维剪切单元。

2.1.3 半连续化方法

介于连续化和离散化之间,该方法按刚度等效原则将空腹夹层板等效为考虑剪切变形的、具有3层结构的连续夹层板,在此基础上进行分层离散,再利用线性变换综合为1个等效单层板进行分析[28]。由于包含大量的构件,每一个综合单元实际上是一种超级单元,不需要太多单元即可达到较高的计算精度[33]。该思路可对各类夹层板进行较为精确的分析,减少了自由度,可提高计算效率。黄勇等[34]基于厚板的位移模式构建了空腹夹层板的超级单元,在保证高精度的同时,能够显著减少自由度。

2.1.4 简化近似方法

该方法利用刚度等效原则,先将空腹夹层板等代为实心板或密肋交叉梁,再利用现有结构分析软件进行建模分析,得到等代结构的内力计算值后,再确定空腹夹层板基本构件的内力设计值,进而进行截面和配筋设计。这也是空腹夹层板结构现有的设计计算规程的基本思路。

林宝新等[35]总结了钢筋混凝土空腹夹层板的理论研究方法和主要技术特点,探讨了该结构体系在工程实践中的实用算法。他们指出,空腹夹层板的理论计算方法有待深入研究,在相应的设计规范出台之前,实际工程计算分析应综合考虑多种力学模型。

2.2 现有的设计技术规程

目前,针对空腹夹层板结构的设计与实践,已有3个地方标准,分别是2005年由贵州省住房和城乡建设厅发布的《钢筋混凝土空腹夹层板楼盖结构技术规程》[6],2014年由黑龙江省住房和城乡建设厅发布的《钢筋混凝土空间网格结构空腹夹层板楼盖技术规程》[7],以及2019年由湖南省住房和城乡建设厅发布的《装配式空腹楼盖钢网格盒式结构技术规程》[8]。

2.2.1 贵州省地方标准:《钢筋混凝土空腹夹层板楼盖结构技术规程》[6]

该规程设计钢筋混凝土空腹夹层板楼盖的实用分析方法,主要为结构的内力计算,以及截面和配筋设计。采用此规程分析结构的内力和挠度时,应遵循平截面和抗弯刚度相等的基本假定。

为了便于利用现有结构分析软件进行内力计算,先将空腹梁等代为实腹梁,从而将空腹夹层板结构等效为常规的密肋井字楼盖。等代的原则是两者的抗弯刚度相等,即空腹梁的折算惯性矩等于实腹梁的惯性矩。如图14所示,在两者截面高度 h 相同的情况下,等代实腹梁的宽度 b_L 由式(3)确定。

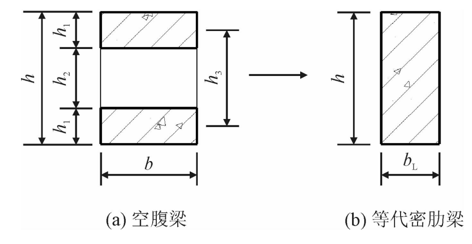


图14 空腹夹层板惯性矩折算

Fig. 14 Conversion of inertia moment of open-web sandwich plate

$$b_L = b\left[1 - \left(\frac{h_2}{h}\right)^3\right] \quad (3)$$

式中:h_2 为空腹夹层板剪力键的净高;b 为空腹夹层板上、下肋的宽度。

确定等代实腹梁的截面尺寸后,可利用现行结构分析软件进行建模计算,算出密肋梁的内力,包括弯矩 M_L 和剪力 V_L,进而利用下式确定空腹夹层板上、下肋的轴力 N 和剪力 V 设计值。

$$N = \frac{M_L}{h_3} \quad (4)$$

$$V = \frac{V_L}{2} \quad (5)$$

式中:M_L 为实腹梁的弯矩值,取网格梁段上的最大弯矩;V_L 为实腹梁的剪力值;h_3 为空腹夹层板的计算高度,取上、下肋的形心间距,如图14所示。

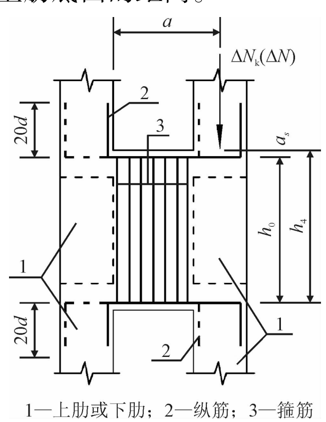
计算出空腹夹层板各个构件的内力后,需对各构件进行承载能力极限状态计算,以进行配筋设计。由于剪力键的破坏机理类似于钢筋混凝土短牛腿,因此参照牛腿建立剪力键的承载力计算公式(图15)。

剪力键的横截面尺寸应满足下式

$$\Delta N_k = 0.8\frac{f_{tk}bh_0}{0.5 + a/h_0} \quad (6)$$

式中:ΔN_k 为按荷载效应标准组合计算的剪力键两

侧上(下)肋轴力差值的较大值;f_{tk}为混凝土轴心抗拉强度标准值;b 和 h_0分别为剪力键横截面宽度和有效高度;a 为上肋形心轴至下肋顶面的距离或下肋形心轴至上肋底面的距离。



1—上肋或下肋;2—纵筋;3—箍筋

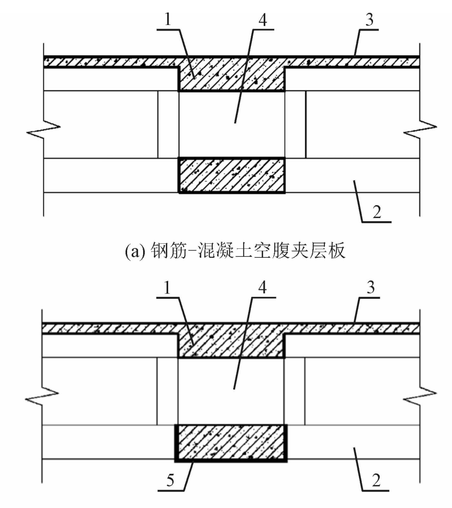
图 15　剪力键钢筋计算简图

Fig. 15　Calculating diagram of the reinforcements in shear key

剪力键纵筋及箍筋按相应的承载力计算公式计算详见规程,此处不再赘述。

2.2.2　黑龙江省地方标准:《钢筋混凝土空间网格结构空腹夹层板楼盖技术规程》[7]

该规程适用于柱网或跨度在 12 ~ 30 m 的工业与民用建筑中钢筋混凝土或 U 型钢-混凝土组合空腹夹层板楼盖的设计与计算。如前文所述,2 种楼盖的区别在于,钢筋混凝土空腹夹层板的下肋为现浇钢筋混凝土,而 U 型钢-混凝土组合夹层板的下肋由 U 型钢板包覆钢筋混凝土而成,详见图 16。



1—上肋;2—下肋;3—上表层薄板;4—剪力键;5—U型钢板

图 16　空腹夹层板剖面图

Fig. 16　Sectional drawings of open-web sandwich plates

空腹夹层板的网格划分应考虑楼盖平面形状及柱网,每个柱网内的网格数不应少于 5 格,网格尺寸取 1.5 ~ 2.5 m,采用的基本假定与 2.2.1 节相似。

如图 17 所示,根据施工方法和构造的不同,空腹夹层板的折算惯性矩 I_x分 3 种情况计算:①当上肋层采用预制带肋板时,可不考虑薄板的刚度贡献;②当上肋层设置叠合层或一次现浇成型时,应考虑表层薄板的刚度贡献;③对于 U 型钢板-混凝土组合空腹夹层板下肋,应按照轴向刚度相等的原则先将组合截面折算为混凝土截面。

设实腹梁与空腹夹层板的截面高度 h 相同,实腹梁的折算宽度 b_L可按下式求出

$$b_L = \frac{12I_x}{h^3} \tag{7}$$

式中,I_x为图 17 中 3 种空腹梁的折算惯性矩。

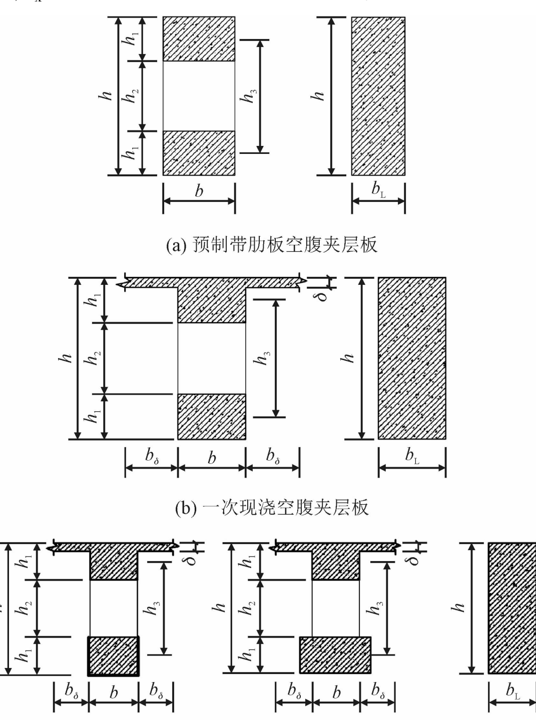


图 17　空腹夹层板刚度折算

Fig. 17　Stiffness conversion of open-web sandwich plates

将 U 型钢板-混凝土组合下肋折算为混凝土截面时,其轴向刚度可按下式计算

$$E_cA = E_cA_c + E_aA_a \tag{8}$$

式中:A 为组合下肋的折算截面积;A_c和 A_a分别为组合下肋混凝土和 U 型钢板的截面积;E_c和 E_a分别为组合下肋混凝土和 U 型钢板的弹性模量。

得到组合下肋的折算混凝土截面积 A 后,再按照钢筋混凝土空腹夹层板的情况进行后续刚度折算,求出等代实腹梁的折算宽度 b_L。后续各构件的内力计算、承载能力极限状态计算及配筋设计与

2.2.1节相似,此处不再赘述。

2.2.3 湖南省地方标准:《装配式空腹楼盖钢网格盒式结构技术规程》[8]

本规程介绍钢空腹夹层板及钢网格筒结构的设计与计算。钢空腹夹层板由混凝土薄板、型钢上/下肋和剪力键组成,其结构组成如图18所示。

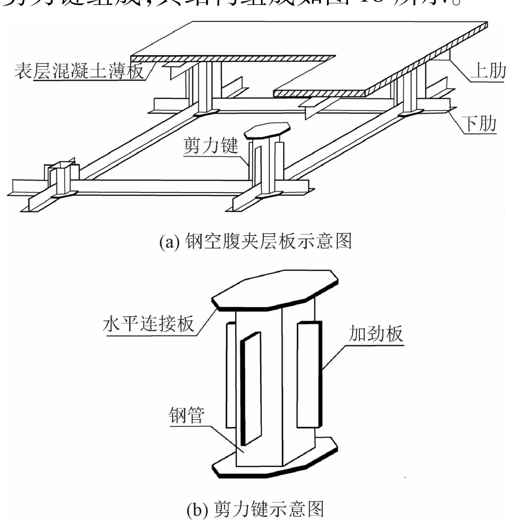


图18 钢空腹夹层板结构及其剪力键示意图

Fig. 18 Schematic views of open-web sandwich plate made of shaped steel and its shear key

为便于利用现有分析软件进行结构设计,本规程介绍了一种实用分析方法。先把钢空腹夹层板按抗弯刚度等效为密肋楼盖后,再在分析软件中建立建筑结构的计算模型,最后根据计算结果及规程规定反算钢空腹夹层板的内力和控制刚度。因篇幅有限,此处不再赘述。

3 空腹夹层板的结构优势及工程应用

3.1 空腹夹层板的优势

在建筑方面,空腹夹层板具有如下优势:①大柱网和大跨度的结构设计可实现建筑上的大开间,建筑空间的使用灵活性更高;②空腹夹层板的结构高度比常规框架结构高度小,一般每层可节约0.25~0.30 m的建筑层高,在建筑限高的情况下,每10层即可多得1层,这在寸土寸金的现代城市,经济效益十分显著;③各种设备管线从空腹夹层板的空腹部分穿越,无需额外设置设备层或吊顶支梁,可节约工程总造价。

在结构方面,空腹夹层板有如下优势:①与常规梁板式结构相比,空腹夹层板楼盖体系可减少混凝土用量约15%,降低结构自重,减小地震作用的影响,进而减少柱、剪力墙和基础的材料用量[4];②空腹夹层板与柱和剪力墙协同工作形成空间抗侧力体系,结构的整体性好、刚度大,从而增强建筑结构的整体刚度和抗震性能。

3.1.1 大开间灵活划分房间

空腹夹层板结构可避免常规结构“有墙必有梁”的弊端,能够实现房间的自由分隔。以普通住宅建筑为例,现行常规结构多采用短肢剪力墙,房间改造的灵活性较低;而空腹夹层板结构(图19)只需设置外墙,内部大开间允许在任意位置设置隔墙,住户可以根据需求自由划分房间,实现建筑空间的灵活布局,社会效益显著。

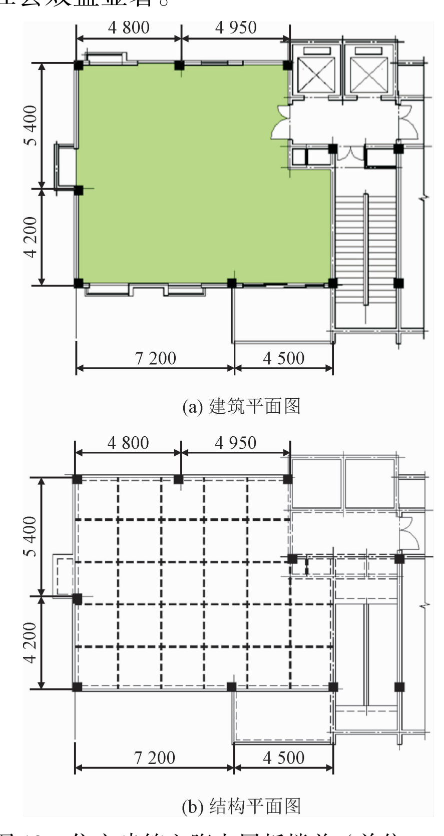


图19 住宅建筑空腹夹层板楼盖(单位:mm)

Fig. 19 Open-web sandwich floor system of residential buildings (unit:mm)

3.1.2 结构高度小可节约层高

框架结构的传力路径明确,技术经济指标较好,但缺点是梁构件尺寸大。一般来说,框架梁的截面高度为跨度的1/12~1/14,次梁高度为跨度的1/14~1/16。再加上管线布置和吊顶,其结构高度往往较大[4],减小了使用净空高度。相比之下,空腹夹层板的结构高度为跨度的1/25~1/30,在建筑高度和跨度不变的情况下,工程造价可降低约10%~

20%。常规框架结构与空腹夹层板结构的结构高度对比如图 20 所示。

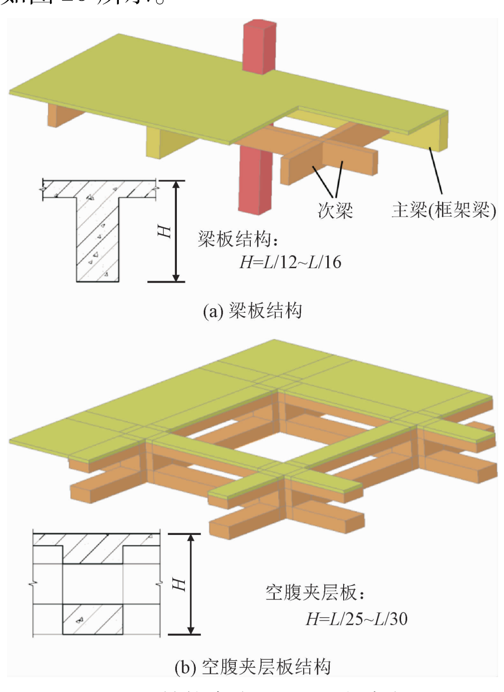


图 20　结构高度对比(L 为跨度)

Fig. 20　Comparison of structure height (L is span)

3.1.3　应用于多高层大跨建筑可节约土地

常规的大跨结构如钢网架、网壳或膜结构多用于单层大跨建筑的屋盖,而空腹夹层板楼盖结构可应用于多高层大跨建筑,能够有效节约土地资源。目前,采用空腹夹层板楼盖的建筑结构跨度已达到 39 m,层数达到 22 层(高度 99 m)。以湖南省湘潭九华工业园厂房为例,原计划修建 8 栋单层厂房,其中 6 栋跨度为 24 m,长度为 87.5 m,总面积为 12 600 m^2;其余 2 栋跨度为 18 m,长度为 87.5 m,总面积为 3 150 m^2;8 栋厂房总面积合计 15 750 m^2,占地约 21 222 m^2(32 亩)。后改为 2 栋 4 层空腹夹层板结构,跨度为 24 m,长度为 84 m,总面积为 16 128 m^2,占地仅 5 333 m^2(8 亩),见图 21(a)建筑规划图中红线所圈区域,节约了 3/4 的土地约 16 000 m^2(24 亩),建成的厂房外景图如图 21(b)所示。



(a) 建筑规划图



(b) 建筑外景图

图 21　湘潭九华工业园厂房

Fig. 21　Factory building of Jiuhua Industrial Park in Xiangtan

3.1.4　经济优势

作为一种新型空间结构,空腹夹层板结构目前尚无定额标准可循。为了说明钢筋混凝土空腹夹层板结构的技术经济指标,常将其与常规结构如密肋井字楼盖、框架结构等进行对比分析。

1)与井字楼盖对比

以原贵州工业大学邵逸夫学术中心的篮球馆屋盖为例,其平面尺寸为 24 m×30 m。对比可知,采用空腹夹层板结构每平方米节约造价约 170 元,共节约造价约 13 万元,占工程总造价的 46%,技术经济指标优于井字楼盖[24]。此外,空腹夹层板允许各类管线自由穿越其空腹部分,而井字楼盖则需将各类管线安装在梁底并设置吊顶来遮住管线,不仅影响室内空间使用,还增加了装修和维护费用。

2)与预应力混凝土框架结构对比

以山东省潍坊市体育运动学校为例,为便于对比,2 栋多层大跨度体育馆建筑分别采用不同的结构体系。其中一栋采用预应力混凝土框架结构,最大梁高达 1.8 m,其主次梁布置见图 22(a),混凝土折算厚度 $\delta = 35$ cm/m^2,用钢量 138 kg/m^2。为保证室内造型美观,消防管线安装在预应力梁底部,还需吊顶来遮住管线,增加了装修及维护费用,减少了用户的使用空间。另一栋采用混凝土空腹夹层板结构,楼盖高度仅有 1.25 m,正交正放的网格布置见图 22(b),混凝土折算厚度 $\delta = 23.7$ cm/m^2,用钢量 82 kg/m^2,每栋建筑可节约混凝土用量 1 215 m^3,钢材用量 602 t。此外,设备管线从空腹夹层板楼盖的空腹内穿越,空间网格本身造型美观,无需吊顶,不仅节约了吊顶的费用,还增加了用户的使用空间。

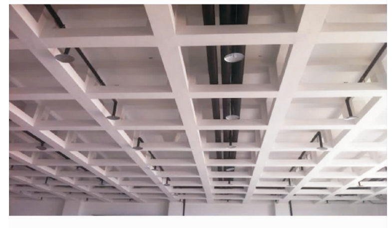
3)与框筒结构对比

以陕西建工集团拟建办公大楼为例,若采用常规框筒结构,混凝土用量为 0.39 m^3/m^2,钢筋用量为 76.2 kg/m^2;若采用空腹夹层板-框筒结构,混凝土用

量为 0.32 m^3/m^2，钢筋用量为 61.2 kg/m^2。主材用量方面，混凝土减少 18%，钢筋减少 20%（按全楼计算）。由于空腹夹层板结构高度小，在建筑总高度、楼层净高和建筑材料用量基本不变的情况下，层数由原来的 22 层增加到 25 层，建筑面积增加了 7 250 m^2。按当地商品房均价估，采用空腹夹层板结构可创造价值上亿元。此外，常规结构的吊顶高度需 300 mm，而空腹夹层板结构的水电管线布置在空腹内，进一步节约层高。层高的降低不仅减少了基础和地下室深度、外墙和隔墙高度，还带来了节能效益，如电梯运行高度、水电造价等。



(a) 预应力混凝土框架结构



(b) 空腹夹层板结构

图 22 预应力混凝土框架与空腹夹层板结构对比

Fig. 22 Comparison of prestressed concrete frame structure and open-web sandwich plate structure

总的来说，与常规结构体系相比，空腹夹层板楼盖结构体系具有显著的经济优势。

3.2 空腹夹层板的工程应用情况

3.2.1 钢筋混凝土空腹夹层板应用案例

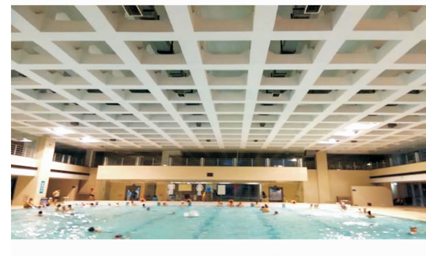
1）正交正放网格工程案例

贵阳市市民健身中心（图 23）采用钢筋混凝土空腹夹层板楼盖结构，建筑共有 4 层，单层平面尺寸为 32 m×40 m，为国内外首个采用多层大跨度空腹夹层板楼盖结构体系的建筑。

为了节约土地，山东省潍坊市体育运动学校的运动场馆（除足球场外）均为多层大跨度建筑，其平面尺寸分别为 32 m×32 m 和 32 m×24 m。为便于对比技术经济指标，不同的场馆分别采用常规预应力混凝土框架结构体系和空腹夹层板楼盖结构体系。其中，排球训练馆采用空腹夹层板楼盖结构，建成实景图如图 24 所示。



(a) 建筑外景图



(b) 建筑内景图

图 23 贵阳市市民健身中心（2010 年建成）

Fig. 23 Guiyang Citizen Fitness Center (built in 2010)



(a) 建筑外景图



(b) 建筑内景图

图 24 潍坊市体育运动学校（2015 年建成）

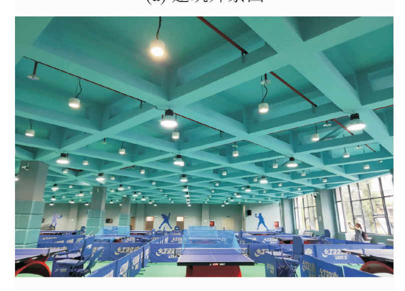
Fig. 24 Weifang Sports School (built in 2015)

2）正交斜放网格工程案例

贵州省老干部活动中心（图 25）为两栋 4 层与 5 层建筑联体，内设会议厅、书画声乐活动厅、乒乓球、篮球、羽毛球、门球和网球等活动场所。其楼盖采用正交斜放钢筋混凝土空腹夹层板结构，其平面尺寸有多种，包括：39 m×39 m、31.2 m×39 m、15.6 m×15.6 m、15.6 m×39 m、15.6 m×23.4 m 和 23.4 m×39 m 等。



(a) 建筑外景图



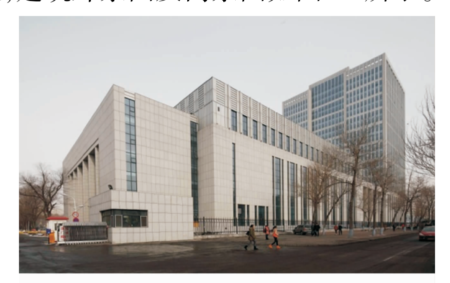
(b) 建筑内景图

图 25　贵州省老干部活动中心(2018 年建成)

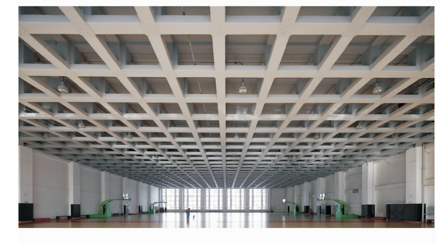
Fig. 25　Guizhou Provincial Activity Center for Veteran Cadre (built in 2018)

3.2.2　U 型钢-混凝土组合空腹夹层板应用案例

黑龙江中医药大学文体中心为 4 层大跨度场馆,其长度为 57 m,跨度分别为 39 m 和 36 m,其建筑面积分别为 2 223 m^2 和 2 052 m^2。采用 U 型钢-混凝土组合空腹夹层板楼盖结构体系,其网格布置为正交正放,建筑外景图及内景图如图 26 所示。



(a) 建筑外景图



(b) 建筑内景图

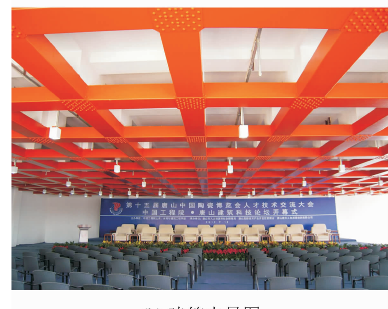
图 26　黑龙江中医药大学文体中心(2007 年建成)

Fig. 26　Cultural and sport center of Heilongjiang University of Chinese Medicine (built in 2007)

唐山市建华检测中心大楼为两层大跨度结构,其楼盖跨度为 25.2 m,长度为 28.8 m,单层建筑面积为 725.76 m^2。原设计采用框架结构,柱网尺寸为 7.2 m×6.3 m,柱网间面积为 45.36 m^2。改用正交正放的 U 型钢-混凝土组合空腹夹层板楼盖结构后,柱网间无遮挡使用面积相当于之前的 16 倍,详见图 27。



(a) 建筑外景图



(b) 建筑内景图

图 27　唐山建华检测中心大楼(2011 年建成)

Fig. 27　Building of Jianhua Testing Center in Tangshan (built in 2011)

河南省洛阳市解放军二炮体育馆为多层大跨度结构,楼盖跨度为 30 m,长度为 38 m,单层建筑面积为 1 140 m^2,采用正交正放的 U 型钢-混凝土组合空腹夹层板楼盖,如图 28 所示。



(a) 建筑外景图



(b) 建筑内景图

图 28　解放军二炮部队体育馆(2015 年建成)

Fig. 28　Gymnasium of the Second Artillery Corps of the PLA (built in 2015)

贵州省博物馆采用多层大跨度异形平面楼盖,

主要包含 5 块空腹夹层板,其中单块板最大跨度为 38 m,长度为 42 m,单板建筑面积为 1 596 m^2,建成外景图及内景图如图 29 所示。



(a) 建筑外景图

(b) 建筑内景图

图 29 贵州省博物馆(2015 年建成)

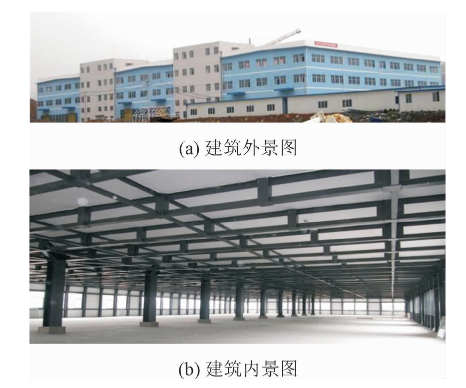
Fig. 29 Guizhou Provincial Museum (built in 2015)

综上所述,采用 U 型钢-混凝土组合空腹夹层板楼盖体系的工程案例较多,此处不一一列举。值得注意的是,现有的 U 型钢-混凝土组合空腹夹层板工程案例中,网格布置均采用正交正放方式,空腹梁与四周边梁垂直相交,目前尚无正交斜放型网格的实际工程案例。

3.2.3 钢空腹夹层板应用案例

1)正交正放工程案例

贵州省黔南州瓮安县创业园原采用常规结构设计为单层厂房,改用装配整体式钢网格空腹夹层板楼盖结构后,单层设计改为 3 层,其网格布置为正交正放方式,如图 30 所示。



(a) 建筑外景图

(b) 建筑内景图

图 30 黔南州瓮安县创业园厂房(2012 年建成)

Fig. 30 Factory building of Entrepreneurship Park in Weng'an county, Qiannan prefecture (built in 2012)

河北省唐山市建华大厦的 23 ~ 24 层采用装配式空间钢网格空腹夹层板楼盖结构,其网格布置为正交正放方式,如图 31 所示。



(a) 建筑外景图

(b) 建筑内景图

图 31 唐山市建华大厦(2012 年建成)

Fig. 31 Jianhua building in Tangshan (built in 2012)

九江市庐山西海舰队球类运动休闲中心的建筑造型按我国首艘航母辽宁舰 1∶1 比例设计而成(图 32),共 4 层,局部 5 层,建筑面积达 21 758.74 m^2,是中部地区已建成的规模最大的球类运动中心。



(a) 建筑效果图



(b) 正交正放钢空腹夹层板

图 32 九江市庐山西海舰队球类运动休闲中心(2020 年建成)

Fig. 32 Ball Sports and Leisure center of Lushan West Sea Fleet in Jiujiang (built in 2020)

结构分为舰首、舰中和舰尾 3 段,舰中和舰尾采用空腹夹层板楼盖,其平面尺寸分别为 32 m × 67 m 和 29.6 m × 40 m。舰首前半段为滑跃式甲板,采管桁架悬挑 36 m;舰首后半段采用正交正放的钢空腹

夹层板楼盖结构,两侧柱网间距为 8 m,主受力方向最大跨度为 29 m,沿舰首方向跨度依次内收至10 m,两侧空腹夹层板最大悬挑 14 m。钢空腹夹层板基本网格尺寸为 2.667 m × 2.667 m,采用工厂预制单元模块现场拼装而成。该项目于 2020 年 7 月荣获第十四届第一批"中国钢结构金奖",凭借该项目,马克俭教授于 2021 年获得"工程建设科学技术进步奖"一等奖。

2)正交斜放工程案例

贵阳市沙文工业园工业车间由两栋两层大跨度建筑组成,最大跨度为 21 m,采用装配整体式空间钢网格空腹夹层板楼盖结构,其网格布置为正交斜放方式,详见图 33。



(a) 建筑外景图

(b) 建筑内景图

图 33　贵州大自然沙文工业园厂房(2013 年建成)

Fig. 33　Factory buildings of Nature Shawen Industrial Park in Guizhou (built in 2013)

湖南省湘潭九华创新园为 4 层大跨度多功能工业厂房,跨度为 24 m,长度为 84 m,采用装配整体式空间钢网格空腹夹层板楼盖结构,单层建筑面积为 2 016 m^2,每栋面积为 8 064 m^2,共计 16 128 m^2。其室内网格采用正交斜放方式,并带有吊车梁(图 34)。

四川省绵阳富乐国际学校体育馆为两层大跨度建筑,其跨度为 36 m,长度为 60 m,采用装配整体式正交斜放钢网格空腹夹层板楼盖结构,其建筑外景图及内部网格布置如图 35 所示。

总的来说,目前采用正交正放和正交斜放网格布置的空腹夹层板结构已有较多工程案例,而蜂窝型网格空腹夹层板仍处于研究阶段,尚未应用于实际工程。



(a) 建筑外景图

(b) 建筑内景图

图 34　湘潭九华工业园厂房(2013 年建成)

Fig. 34　Factory building of Jiuhua Industrial Park in Xiangtan (built in 2013)



(a) 建筑外景图

(b) 建筑内景图

图 35　绵阳富乐国际学校体育馆(2014 年建成)

Fig. 35　Gymnasium of fule International School in Mianyang (built in 2014)

值得一提的是,团队前期开展了蜂窝型空腹夹层板楼盖模型的超载试验,模型按原型 1/4 比例设计,用 C40 混凝土制作,结构边长为 4.042 m,结构高度为 0.35 m,占结构跨度的 1/20。模型的设计荷载为 5.5 kN/m^2,在实验室按 2.1 倍超载试验后,仍完好无损。随后,该结构被移出实验室,通过在其上浇筑混凝土薄板,用作办公楼旁六边形凉亭屋盖,亦作展示之用(图 36)。

目前,空腹夹层板结构工程应用已在全国 30 余个省(市、自治区)推广应用,应用面积达 300 余万平方米,取得了显著的经济和社会效益[6]。



(a) 蜂窝型楼盖承载试验

(b) 六边形凉亭实景图

图 36　蜂窝型钢筋混凝土空腹夹层板

Fig. 36　Honeycomb-shaped open-web sandwich floor made of reinforced concrete

3.3　空腹夹层板的应用前景

空腹夹层板楼盖结构体系在多层大跨度建筑中展现了突出的结构优势,不仅可以替代常规工业车间中常用的门式屋架,还能够取代公共建筑中常用的井字楼盖和密肋楼盖,在工业和民用建筑,尤其是公共建筑中具有广阔的应用前景。相比于传统的结构形式,多层大跨度空腹夹层板楼盖可以变单层建筑为多层建筑,尤其适合在土地紧缺地段修建多层综合性场馆,能够在占地面积不变的情况下提供更大的建筑使用面积[36]。

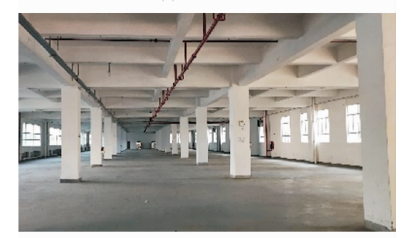
3.3.1　工业建筑

工业建筑为实现大空间,多采用单层钢结构厂房,并根据研发、管理和生产等功能分栋建设,导致工业用地容积率和单位用地面积产出率普遍较低。

目前国内已建成的门式刚架厂房多为单层厂房,占地面积大,浪费土地资源。为了节约土地,国家提倡建设多层工业厂房。多层工业厂房通常采用框架结构(图 37),消防管线布置在框架梁下,导致结构净空减小,且柱网较密,难以适应工业或工艺变更需求。相比之下,采用大跨度空腹夹层板楼盖结构体系的多层厂房,中间无柱,便于工厂的生产工艺布置,能够更好地满足企业的实际需求。



(a) 门式钢架



(b) 框架结构



(c) 多层工业厂房园区

图 37　工业建筑结构需求

Fig. 37　Structural requirements of industrial buildings

3.3.2　民用建筑

对民用建筑来说,随着建筑功能需求日益多样化和复杂化,往往需要通过建设多个功能单一的单体建筑来满足各种需求,从而形成城市综合体建筑群。城市综合体基本具备现代城市的全部功能,一定程度上提高了土地的利用效率。然而,用多个功能单一的单体建筑来满足不同的功能需求,占地面积大不说,使用上仍不够便利。新型空腹夹层板结构能够将众多不同功能集中在同一栋建筑物中(图 38),以单栋建筑替代之前的建筑群,满足多功能需求的同时,极大地节约土地资源并提升空间利用效率。



图 38　现代建筑的多功能需求

Fig. 38　Multi-functional requirements of modern buildings

3.3.3　装配式建筑

围绕国家推动建筑装配化的倡议,结合空腹夹层板的应用推广需求,团队开展了钢筋混凝土空腹

夹层板的装配技术研究。作为一种空间网格结构,钢筋混凝土空腹夹层板具有装配化属性:通过将装配节点设置在网格反弯点处,可以将整块板划分为若干个尺寸相同的基础网格单元,再根据机械吊装能力将基础网格组合成更大的拼装单元。由于这些基础单元的尺寸相同,便于预制构件的模数化设计和制作,从而提高预制模板的通用性和周转率,促进生产、物流及施工各环节的高效协调。

为验证装配式钢筋混凝土空腹夹层板装配工艺技术的可行性,团队于 2023 年开展了 1∶1 足尺模型试验,如图 39 所示。



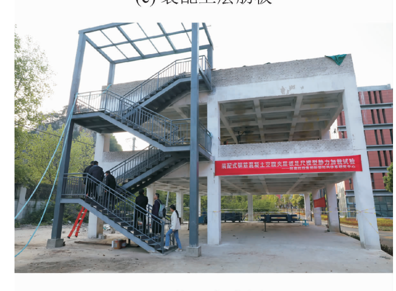
(a) 装配框架柱



(b) 装配空腹梁



(c) 装配上层肋板



(d) 装配完成图

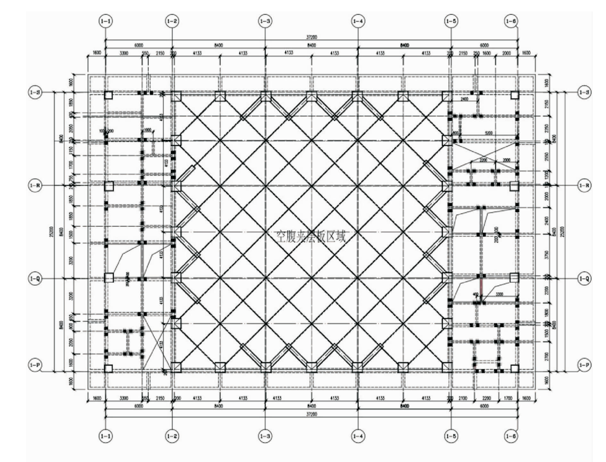
图 39　足尺试验模型现场装配图(2023 年完成)

Fig. 39　On-site assembly process of full scale test model (completed in 2023)

试验模型为正交正放钢筋混凝土空腹夹层板结构,周边柱网间距 6 m,短跨 12 m,长跨 18 m,层高 4 m,两层共 8 m。每层共计 20 个双十字形空腹夹层板网格拼装单元,10 个边框架梁拼装单元,10 个框架柱拼装单元,均采用通用模具现场预制成型,然后进行装配施工。模型试验的顺利实施,验证了相关装配工艺的可靠性,对装配式钢筋混凝土空腹夹层板结构的推广应用具有重要意义。

3.3.4　工业上楼

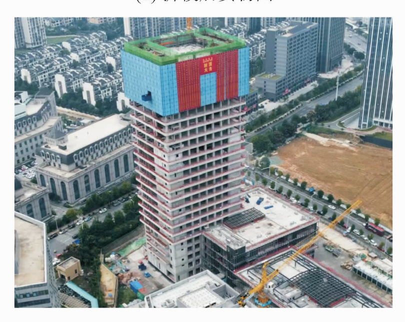
随着增量时代向存量时代的转变,工业用地供需矛盾日益加剧,如何合理配置现有场地资源、提升土地资源利用率成为关键问题。基于此,“工业上楼”模式应运而生,如图 40 所示。



(a) 标准层平面布置图



(b) 拆模后实物图



(c) 项目主体封顶

图 40　“工业上楼”创新实践:同有科技 1#厂房(2024 年建成)

Fig. 40　Innovative practice of high-rise industrial building: factory building No. 1 of Toyou Feiji Technology Co., Ltd. (built in 2024)

近年来,团队积极开发钢筋混凝土空腹夹层板楼盖结构体系,并在“同有科技存储系统及 SSD 研发智能制造基地 1#厂房”项目中,首次将钢筋混凝土空腹夹层板结构应用于高层大跨度建筑,这在国内外属首创。该项目建筑总高度为 99.6 m,共 22 层,单层面积为 937.44 m^2,建筑总面积为 20 623.68 m^2。空腹夹层板网格采用正交斜放布置,楼盖与周边密柱深梁刚性连接,形成空间交错框架协同变形,使结构呈现筒体受力状态。该项目中,空腹夹层板结构的最大跨度为 25.2 m,高度为 1.1 m,空腹高度为 0.5 m,便于设备管线穿越。本项目从建筑和结构上颠覆了传统厂房,创造了全新的工业载体空间模式,为实现“大跨度工业上楼”提供了新的思路。

3.3.5　其他应用潜力

1)高架城市构想

高架城市是唐春安等[37]提出的一种城市发展理念。通过将人居活动空间上移,基础设施下移,构建人居活动层、城市交通层和地下基础设施层的 3 层空间,从而形成立体的城市空间。目前,在重庆和香港,受地形影响,许多建筑和交通设施已呈现一些“高架”特征,在一定程度上提升了城市空间利用率和交通效率。然而,要实现真正的人车分流,保障大型交通枢纽和路口的交通通畅、视野开阔以及行车安全,不仅需要在交通空间层构建高效的交通系统,还要为上部的人居活动层提供足够的活动空间。这就要求交通层顶部设计为多层的大跨度结构,但常规的大跨度结构体系,如钢网架或壳体结构,难以满足这一要求。因此,要实现高架城市理念需要创新的结构体系作为支撑,而大跨度空腹夹层板楼盖结构能够完美应对以上挑战,为新型城市建设提供了一种可行方案。

2)特殊功能性建筑

特殊功能性建筑,例如歌剧院,在建筑结构设计时需综合考虑观众厅的空间视野以及声音的清晰度、丰满度和平衡度。除了合理设计空间的形状,如采用椭圆形或马蹄形的观众厅设计,有利于声音的聚焦和扩散,避免声音反射、散射和吸收不均,还需要配备各种舞台机械设施,如升降舞台、旋转舞台和吊杆系统等。建筑结构不仅要能够承受这些机械设施的重量和运行时产生的动荷载,还要为机械设施的运行提供足够的空间。采用大跨度空腹夹层板结构,其下肋既作为结构的永久受力构件,又可作为吊杆系统的基座,较常规结构另设吊顶更具安全性和经济性。此外,空腹内可穿越管线,便于结构及舞台机械设施的维护。

4　结束语

与传统结构相比,空腹夹层板结构具有突出的建筑和结构优势,不仅能实现大跨度灵活划分空间、减轻结构自重、减小地震作用影响,还节省建筑用材、节约层高、节约土地资源,表现出显著的经济效益和社会效益。大跨度空腹夹层板楼盖应用于多高层建筑,可以克服单层建筑的弊端,在占地面积不变的前提下提供更大的使用空间,实现更多的使用功能,提升土地的利用效率。除了应用于一般公共建筑和工业建筑,该结构还有望推动装配式建筑、工业上楼、高架城市及其他功能性建筑的蓬勃发展。总之,大跨度空腹夹层板楼盖结构体系在多高层建筑中具有广阔的应用前景,对节约土地并促进我国生态文明建设有重要意义。

参考文献:

[1]　张定华,马克俭.剪力键式空腹夹层板动力响应的研究[J].空间结构,1996,2(4):30-33.
ZHANG Dinghua, MA Kejian. The study of dynamic response of shear blocks dowelled open web sandwich plates[J]. Spatial structures,1996,2(4):30-33(in Chinese).

[2]　马克俭,张华刚,肖建春,等.中国钢筋混凝土空间网格结构新体系的开拓与发展(上)[J].中国工程科学,2008,10(7):4-17.
MA Kejian,ZHANG Huagang,XIAO Jianchun,et al. Development of new systems of reinforced concrete spatial grid structure in China (part Ⅰ)[J]. Engineering sciences,2008,10(7):4-17 (in Chinese).

[3]　马克俭,张华刚,肖建春,等.中国钢筋混凝土空间网格结构新体系的开拓与发展(下)[J].中国工程科学,2008,10(8):22-34.
MA Kejian,ZHANG Huagang,XIAO Jianchun,et al. Development of new systems of reinforced concrete spatial grid structure in China (part Ⅱ)[J]. Engineering sciences,2008,10(8):22-34(in Chinese).

[4]　马克俭,黄勇,张华刚,等.多层与高层建筑钢筋砼空腹夹层板与鱼骨式空腹夹层板楼盖结构体系的研究与应用[J].贵州工业大学学报(自然科学版),1997,26(4):4-12.
MA Kejian,HUANG Yong,ZHANG Huagang,et al. Study and application of reinforced concrete open web sandwich plate and plshy bone open web sandwich plate in the floor structure system in multistorey and tall buildings[J]. Journal of Guizhou University of Technology,1997,26(4):4-12(in Chinese).

[5] 马克俭，黄勇，肖建春，等. 钢筋混凝土网架与空腹夹层板空间结构的研究与应用综述[J]. 空间结构，1995，1(3)：28-36.
MA Kejian，HUANG Yong，XIAO Jianchun，et al. Overall review on the study and application of reinforced concrete grid structures and open-web sandwich plate space structures[J]. Spatial structures，1995，1(3)：28-36(in Chinese).

[6] 贵州省建设厅. 钢筋混凝土空腹夹层板楼盖结构技术规程：DB22/48—2005[S]. 贵阳：贵州省建设厅，2005.

[7] 黑龙江住房和城乡建设厅，黑龙江省质量技术监督局. 钢筋混凝土空间网格结构空腹夹层板楼盖技术规程：DB23/T 1539—2014[S]. 哈尔滨：黑龙江住房和城乡建设厅，2014.

[8] 湖南省住房和城乡建设厅. 装配式空腹楼盖钢网格盒式结构技术规程：DBJ 43/T 351—2019[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2019.

[9] 张华刚，张钰，卢亚琴，等. 新型混凝土空间网格结构的发展现状及工程实践[J]. 贵州大学学报(自然科学版)，2021，38(6)：1-9.
ZHANG Huagang，ZHANG Yu，LU Yaqin，et al. Development status and engineering application of new type concrete spatial grid structure[J]. Journal of Guizhou University(natural sciences)，2021，38(6)：1-9(in Chinese).

[10] 陈靖. 高层钢网格盒式筒中筒混合结构在高烈度区的研究与应用[D]. 贵阳：贵州大学，2019.

[11] 魏艳辉，马克俭，张华刚. 上、下弦反弯点处装配整体式钢空腹夹层板静力试验分析[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版)，2008，37(4)：79-82.
WEI Yanhui，MA Kejian，ZHANG Huagang. Analysis of static test for assembled monolithic steel vierendeel sandw ich plate[J]. Journal of Guizhou University of Technology(natural science edition)，2008，37(4)：79-82(in Chinese).

[12] 孙涛，何秋霖，马克俭，等. 钢空腹夹层板结构基本力学性能[J]. 后勤工程学院学报，2016，32(5)：10-16.
SUN Tao，HE Qiulin，MA Kejian，et al. Mechanical performance of steel vierendeel sandwich plate structure[J]. Journal of Logistical Engineering University，2016，32(5)：10-16 (in Chinese).

[13] 刘卓群，马克俭，肖建春，等. 混凝土板对钢空腹夹层板楼盖静力性能影响分析[J]. 广西大学学报(自然科学版)，2016，41(1)：1-10.
LIU Zhuoqun，MA Kejian，XIAO Jianchun，et al. The influence of concrete slab on static behavior of steel open-web sandwich slab[J]. Journal of Guangxi University(natural science edition)，2016，41(1)：1-10(in Chinese).

[14] 姜岚，马克俭，张华刚，等. 协同式空腹夹层板动力特性分析及舒适度研究[J]. 地震工程与工程振动，2017，37(6)：122-131.
JIANG Lan，MA Kejian，ZHANG Huagang，et al. The dynamic property and comfort degree study on the steel-concrete composite vierendeel sandwich plate[J]. Earthquake engineering and engineering dynamics，2017，37(6)：122-131(in Chinese).

[15] 姜岚，马克俭，张华刚，等. 大跨度空腹夹层板楼盖基于行走路线法的舒适度时程分析[J]. 空间结构，2016，22(2)：28-36.
JIANG Lan，MA Kejian，ZHANG Huagang，et al. Dynamic time-history analysis of large span open-web sandwich plate for vibration comfort based on walking route method[J]. Spatial structures，2016，22(2)：28-36 (in Chinese).

[16] 姜岚，张华刚. 大跨度空腹夹层板楼盖基于舒适度要求的动力特性分析[J]. 空间结构，2014，20(3)：56-60.
JIANG Lan，ZHANG Huagang. Dynamic analysis of large span open-web sandwich plate based on comfort requirement[J]. Spatial structures，2014，20(3)：56-60 (in Chinese).

[17] 姜岚，张华刚，马克俭，等. 钢-混凝土协同式组合空腹夹层板楼盖舒适度分析[J]. 贵州大学学报(自然科学版)，2011，28(4)：101-105.
JIANG Lan，ZHANG Huagang，MA Kejian，et al. Research on comfortableness of the stell-concrete collaborative composite vierendeel sandwich plate of floor structure under walking excitation[J]. Journal of Guizhou University(natural sciences)，2011，28(4)：101-105(in Chinese).

[18] 胡岚，马克俭. U 形钢板-混凝土高强螺栓连接组合空腹夹层板楼盖结构研究与应用[J]. 建筑结构学报，2012，33(7)：61-69.
HU Lan，MA Kejian. Research and application of U-shaped steel plate-concrete composite open-web sandwich slab structure with high strength bolts[J]. Journal of building structures，2012，33(7)：61-69(in Chinese).

[19] 胡岚，马克俭，易伟建，等. U 形钢板-混凝土高强螺栓连接组合空腹夹层板楼盖舒适度实测与研究[J]. 建筑结构学报，2012，33(7)：70-75.
HU Lan，MA Kejian，YI Weijian，et al. Test and research of comfortable degree of structure of high strength bolts connected U-shaped steel plate-concrete composite open-web sandwich floor[J]. Journal of building structures，2012，33(7)：70-75(in Chinese).

[20] 黄勇，安竹石，马克俭. 组合空腹板板柱结构设计与研究[J]. 建筑结构学报，2002，23(5)：63-66.
HUANG Yong，AN Zhushi，MA Kejian. The design and study of composite vierendeel plate-column structure[J]. Journal of building structures，2002，23(5)：63-66(in Chinese).

[21] 杜德静. 钢-混凝土组合空腹板架的理论研究与分析[D]. 贵阳：贵州大学，2007.

[22] 杜德静，黄勇，杨想红. 钢-混凝土组合空腹板架静力特性理论研究[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版)，2008，37(3)：130-133.
DU Dejing，HUANG Yong，YANG Xianghong. Theoretical study of static behavior of the steel-concrete composite open-web floor[J]. Journal of Guizhou University of Technology(natural science edition)，2008，37(3)：130-133(in Chinese).

[23] 黄勇，陈伟刚，白小冬，等. 钢-混凝土组合空腹板架结构地震响应研究[J]. 建筑结构学报，2009，30(增刊2)：149-153.
HUANG Yong，CHEN Weigang，BAI Xiaodong，et al. Seismic response study of steel-concrete composite open-web plate frame[J]. Journal of building structures，2009，30(S2)：149-153(in Chinese).

[24] 马克俭，黄勇，肖建春，等. 大跨度钢筋混凝土空腹夹层板柱结

构研究与应用[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版),1998,27(5):92-96.
MA Kejian,HUANG Yong,XIAO Jianchun,et al. The study vierendeel sandwich plate column and its application to large span buildings[J]. Journal of Guizhou University of Technology(natural science edition),1998,27(5):92-96(in Chinese).

[25] 马克俭,张华刚,黄勇,等. 大跨度钢筋混凝土空腹夹层板柱结构的研究与应用[J]. 建筑结构学报,2000,21(6):16-23.
MA Kejian,ZHANG Huagang,HUANG Yong,et al. Study and application of long span reinforced concrete vierendeel sandwich plate [J]. Journal of building structures,2000,21(6):16-23(in Chinese).

[26] 马克俭,肖建春. 钢筋混凝土空腹夹层板整体稳定分析[J]. 贵州工业大学学报,1997,26(4):16-23.
MA Kejian, XIAO Jianchun. Analysis of overall buckling of rc open-web sandwich plates[J]. Journal of Guizhou University of Technology,1997,26(4):16-23(in Chinese).

[27] 段渝忠,黄勇,马克俭. 空腹夹层板节点破坏试验分析[J]. 贵州工业大学学报,1999,28(2):100-102.
DUAN Yuzhong,HUANG Yong,MA Kejian. Analysis of destructive test for vierendeel sandwich plate[J]. Journal of Guizhou University of Technology,1999,28(2):100-102(in Chinese).

[28] 黄勇,马克俭,张华刚,等. 钢筋混凝土空腹夹层板楼盖体系的研究与应用[J]. 建筑结构学报,1997,18(6):55-64.
HUANG Yong,MA Kejian,ZHANG Huagang,et al. Study and application of vierendeel-sandwich-plate floor framing in multistoried and tall building[J]. Journal of building structures,1997,18(6):55-64(in Chinese).

[29] 张华刚,黄勇. 空腹夹层板的拟夹层板分析法[J]. 贵州工业大学学报,1997,26(4):73-82.
ZHANG Huagang,HUANG Yong. Sandwich plate analogy method for open-web sandwich plate[J]. Journal of Guizhou University of Technology,1997,26(4):73-82(in Chinese).

[30] 黄勇,戚欣,马克俭. 空腹夹层板连续化分析的两种模型[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版),2001,30(1):88-95.
HUANG Yong,QI Xin,MA Kejian. Two models of analogy sandwich plate analysis for open-sandwich plate[J]. Journal of Guizhou University of Technology(natural science edition),2001,30(1):88-95(in Chinese).

[31] 肖建春,马克俭. 采用剪力键式双向空心大板体系的多、高层建筑结构的有限元分析[J]. 贵州工业大学学报,1997,26(4):42-65.
XIAO Jianchun,MA Kejian. Fem for analysis of the structures of multistorey and tall buildings with shear blocks dowelled bidirectional hollow plates[J]. Journal of Guizhou University of Technology,1997,26(4):42-65(in Chinese).

[32] 陈波,黄勇,马克俭. 空腹夹层板有限元分析的两种模型[J]. 建筑结构,2001,31(4):58-60.
CHEN Bo,HUANG Yong,MA Kejian. Two models of finite element analysis for open-web sandwich plate[J]. Building structure,2001,31(4):58-60(in Chinese).

[33] 黄勇,黄建,马克俭. 大跨度夹层板柱结构的拟板(夹层板)半连续化分析方法[J]. 贵州工业大学学报,1998,27(5):97-101.
HUANG Yong, HUANG Jian, MA Kejian. Analysis of vierendeel sandwich plate structure by the finite strip method[J]. Journal of Guizhou University of Technology,1998,27(5):97-101 (in Chinese).

[34] 黄勇,马克俭,陈波. 多层空腹夹层板柱结构的动力特性研究[J]. 建筑结构学报,2000,21(3):23-29.
HUANG Yong,MA Kejian,CHEN Bo. The study of dynamic behavior for multi storied vierendeel sandwich plate column structure [J]. Journal of building structures,2000,21(3):23-29(in Chinese).

[35] 林宝新,余旭. 钢筋混凝土空腹夹层板空间结构的工程应用与计算方法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2004,27(5):543-547.
LIN Baoxin,YU Xu. An application case of the RC open-web sandwich plate space structure and the calculation method[J]. Journal of Hefei University of Technology(natural science),2004,27(5):543-547(in Chinese).

[36] 胡朝英. 空腹夹层板静动力特性理论计算与试验研究[J]. 郑州大学学报(理学版),2018,50(1):123-126.
HU Zhaoying. Theoretical calculation and experimental study on static and dynamic characteristics of vierendeel sandwich plate[J]. Journal of Zhengzhou University(natural science edition),2018,50(1):123-126(in Chinese).

[37] 唐春安,杨菊英,王凯凯. 高架城市及其城市空间发展的三层结构模式[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(3):637-642.
TANG Chun'an,YANG Juying,WANG Kaikai. Concept of elevated city and three layer model for urban space[J]. Chinese journal of underground space and engineering,2019,15(3):637-642(in Chinese).

(编辑 黄崇亚 吕茵)